

(19)



JAPANESE PATENT OFFICE

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11) Publication number: 11312825 A

(43) Date of publication of application: 09 . 11 . 99

(51) Int. Cl

H01L 33/00

H01S 3/18

// H01L 21/205

(21) Application number: 10119377

(71) Applicant: NICHIA CHEM IND LTD

(22) Date of filing: 28 . 04 . 98

(72) Inventor: YAMADA TAKAO

(54) METHOD FOR GROWING NITRIDE
SEMICONDUCTOR AND NITRIDE
SEMICONDUCTOR ELEMENT

a substrate.

COPYRIGHT: (C)1999,JPO

(57) Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a method for growing nitride semiconductor having few crystal defects which is to be a substrate, and an element of new structure comprising a nitride semiconductor substrate.

SOLUTION: On a hetero-substrate 1, a first nitride semiconductor layer 2 is grown, on which a protective film 3 is formed, and a part of the first nitride semiconductor layer 2 is removed to form ruggedness, and in order that the growth of nitride semiconductor at an end surface of the first nitride semiconductor layer 2 a side surface of recessed part exposed to a recessed part bottom surface be preferred, length of the end surface of exposed first nitride semiconductor layer 2 and width of the opening part of the recessed part are adjusted to form the ruggedness. On the first nitride semiconductor layer 2 where the rough is formed, a second nitride semiconductor layer 4 is grown to provide a nitride semiconductor which is to be the substrate 1. An element structure is formed with the nitride semiconductor 4 as



(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平11-312825

(43) 公開日 平成11年(1999)11月9日

(51) Int.Cl.⁸
H 01 L 33/00
H 01 S 3/18
- // H 01 L 21/205

識別記号

F I
H 01 L 33/00
H 01 S 3/18
H 01 L 21/205

C

審査請求 未請求 請求項の数4 O.L (全11頁)

(21) 出願番号 特願平10-119377

(22) 出願日 平成10年(1998)4月28日

(71) 出願人 000226057
日亜化学工業株式会社
徳島県阿南市上中町岡491番地100

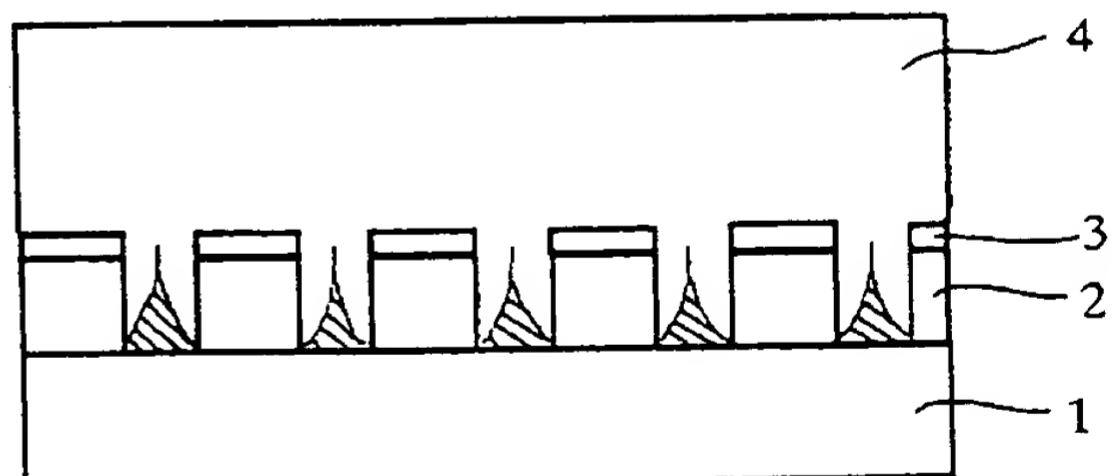
(72) 発明者 山田 孝夫
徳島県阿南市上中町岡491番地100 日亜化
学工業株式会社内

(54) 【発明の名称】 窒化物半導体の成長方法及び窒化物半導体素子

(51) 【要約】

【課題】 基板となる結晶欠陥の少ない窒化物半導体の成長方法と、窒化物半導体基板を有する新規な構造の素子を提供することにある。

【解決手段】 異種基板1上に、第1の窒化物半導体層2を成長させ、この上に保護膜3を形成させ、第1の窒化物半導体層2を一部除去して凹凸を形成し、凹部底面に対して凹部側面の露出された第1の窒化物半導体層の端面への窒化物半導体の成長が優先されるように、露出された第1の窒化物半導体層2の端面の長さと凹部の開口部の幅とを調整して凹凸が形成されており、凹凸が形成された第1の窒化物半導体層2の上に第2の窒化物半導体層5を成長させ、基板となる窒化物半導体を得る。またこの窒化物半導体を基板とし素子構造を形成する。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 壕化物半導体と異なる材料よりなる異種基板の上に、第1の塙化物半導体層を成長させる第1の工程と、

第1の工程後、第1の塙化物半導体層の上に保護膜を形成する第2の工程と、

第2の工程後、第1の塙化物半導体層の端面を露出させるために、第1の塙化物半導体層の一部を除去して凹凸を形成する第3の工程と、

第3の工程後、第2の塙化物半導体層を成長させる第4の工程とを含み、

更に前記凹凸を形成する際に、凹部の底面に対して露出された第1の塙化物半導体層の端面への塙化物半導体の成長が優先されるように、露出された第1の塙化物半導体層の端面の長さと凹部の開口部の幅とを調整することを特徴とする塙化物半導体の成長方法。

【請求項2】 前記凹凸の形状が、凹部の開口部の幅(w)と、第1の塙化物半導体層の端面の長さ(d)とが、 $0 < w/d \leq 5$ となるように調整して形成されることを特徴とする請求項1に記載の塙化物半導体の成長方法。

【請求項3】 前記凹部の底面が、異種基板面であることを特徴とする請求項1又は2に記載の塙化物半導体の成長方法。

【請求項4】 前記塙化物半導体の成長方法で得られる第2の塙化物半導体の上に、素子構造となる少なくともn型及びp型の塙化物半導体が形成されていることを特徴とする塙化物半導体素子。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は塙化物半導体($In_xAl_yGa_{1-x-y}N$, $0 \leq x, y, x+y \leq 1$)の成長方法に係り、特に塙化物半導体よりなる基板の成長方法に関する。また、本発明は、前記塙化物半導体よりなる基板を用い発光ダイオード、レーザダイオード等の発光素子、あるいは太陽電池、光センサー等の受光素子に使用される塙化物半導体($In_xAl_yGa_{1-x-y}N$, $0 \leq x, y, x+y \leq 1$)よりなる塙化物半導体素子に関する。

【0002】

【従来の技術】近年、塙化物半導体からなる青色、青緑色の発光ダイオード、レーザダイオードが実用化されたり実用可能になっている。このような塙化物半導体素子は、現在のところ塙化物半導体と完全に格子整合する基板が未だ開発されていないために、格子定数が異なるサファイアの上に塙化物半導体層を強制的に成長させて形成されている。そのためサファイア基板上に成長された塙化物半導体の結晶には、格子整合した基板上に成長された赤色レーザ素子等と比べると、非常に多くの結晶欠陥が発生する。

10 【0003】本発明者等は、結晶欠陥を大幅に低減できる塙化物半導体の結晶成長方法として、塙化物半導体と異なる異種基板上にGaN基板を形成し、そのGaN基板上に素子構造を形成することにより、波長約400nm、光出力2mWで連続発振約1万時間を達成できる塙化物半導体レーザ素子などを開示している(例えば「InGaN系多重量子井戸構造半導体レーザの現状」、第58回応用物理学会学術講演会、講演番号4aZC-2, 1997年10月、"Present Status of InGaN/AIGaN based Laser Diodes", The Second International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS'97), 講演番号S-1, 1997年10月などに記載されている。)。

20 【0004】上記の結晶成長方法は、サファイア基板上に、従来の結晶欠陥が非常に多いGaN層を薄く成長させ、その上にSiO₂よりなる保護膜を部分的に形成し、その保護膜の上からハライド気相成長法(HVPE)、有機金属気相成長法(MOVPE)等の気相成長法により、GaNの横方向への成長を利用し、再度GaN層を成長させることにより結晶欠陥の少ないGaN基板(膜厚10μm)を形成する技術である。この方法は塙化物半導体を保護膜上で横方向に成長させることから、一般にラテラルオーバーグロウス(lateral over growth: LOG、ラテラル成長)と呼ばれている。

【0005】

【発明が解決しようとする課題】上記のラテラル成長は、従来の塙化物半導体に比べ結晶欠陥を大幅に低減できるが、LED素子、LD素子、受光素子等の数々の電子デバイスに使用される塙化物半導体素子を作製する際に用いられる塙化物半導体の基板として、さらに結晶欠陥の少ない基板として作製することができれば、その基板の上に新たな塙化物半導体を成長させて、格子欠陥が少ない塙化物半導体が成長できるので、それら素子の結晶性が飛躍的に良くなり、従来実現されていなかった素子が実現できるようになる。そこで、本発明の目的は、結晶欠陥の少ない結晶性のより良い塙化物半導体の成長方法を提供することにあり、具体的には基板となる結晶欠陥の少ない塙化物半導体の成長方法と、塙化物半導体基板を有する新規な構造の素子を提供することにある。

【0006】

【課題を解決するための手段】即ち、本発明の目的は、以下の(1)～(4)の本発明の構成によって達成することができる。

(1) 壙化物半導体と異なる材料よりなる異種基板の上に、第1の塙化物半導体層を成長させる第1の工程と、第1の工程後、第1の塙化物半導体層の上に保護膜を形成する第2の工程と、第2の工程後、第1の塙化物半導体層の端面を露出させるために、第1の塙化物半導

体層の一部を除去して凹凸を形成する第3の工程と、第3の工程後、第2の窒化物半導体層を成長させる第4の工程とを含み、更に前記凹凸を形成する際に、凹部の底面に対して露出された第1の窒化物半導体層の端面への窒化物半導体の成長が優先されるように、露出された第1の窒化物半導体層の端面の長さと凹部の開口部の幅とを調整することを特徴とする窒化物半導体の成長方法。

(2) 前記凹凸の形状が、凹部の開口部の幅 (w)

と、第1の窒化物半導体層の端面の長さ (d) とが、 $0 < w/d \leq 5$ となるように調整して形成されることを特徴とする請求項1に記載の窒化物半導体の成長方法。

(3) 前記凹部の底面が、異種基板面であることを特徴とする請求項1又は2に記載の窒化物半導体の成長方法。

(4) 前記窒化物半導体の成長方法で得られる第2の窒化物半導体の上に、素子構造となる少なくともn型及びp型の窒化物半導体が形成されていることを特徴とする窒化物半導体素子。

【0007】つまり、本発明の成長方法は、第1の窒化物半導体層に凹凸を形成して第1の窒化物半導体層の端面を露出させ、且つ、凹凸の形状を調整し第1の窒化物半導体層の端面からの第2の窒化物半導体層の成長を凹部底面からの成長よりも優先させることにより、凹凸を有する第1の窒化物半導体層上に成長された第2の窒化物半導体層の表面に現れる結晶欠陥を低減することができる。

【0008】前記本発明者等の発表した窒化物半導体の成長方法は、結晶欠陥を低減させることができ、結晶欠陥の少ない窒化物半導体を得ることができ、この窒化物半導体を基板として作製されたレーザは、寿命特性などが向上し、実用可能な良好な素子性能を有している。基板となる窒化物半導体層の表面に現れている結晶欠陥の密度は、透過型電子顕微鏡観察をすると、 $2 \times 10^7 / \text{cm}^2$ であった。しかし、実用性を更に向上させるべく、基板となる窒化物半導体の結晶欠陥をより一層低減させることが望まれている。

【0009】これに対し、本発明者は、従来のラテラル成長における結晶欠陥の転位の傾向など更に検討を重ねた結果、保護膜を有していない部分から成長する窒化物半導体の縦方向の成長と共に縦方向に転位し続ける結晶欠陥が存在するために、基板となる窒化物半導体の表面に結晶欠陥が現れているのではないかと推測した。そこで、本発明者は、基板となる窒化物半導体層（第2の窒化物半導体層）の成長を実質的に全て横方向の成長から始めさせることができれば、結晶欠陥が転位しにくくなるのではないかという考察をもとに、上記の如く本発明の構成とすることによって、窒化物半導体基板となる結晶欠陥の少ない第2の窒化物半導体層を得ることができる。本発明において、上記【成長を実質的に全て横方向の成長から始める】とは、窒化物半導体が成長しにくい

材料からなる保護膜上に、わずかにアモルファス状のものが成長する場合があるが、これは成長していないものとみなすことを示す。本発明の成長方法により形成される第2の窒化物半導体層の表面の結晶欠陥密度は、表面透過型電子顕微鏡観察をすると、第2の窒化物半導体層の表面の結晶欠陥密度は、 $1 \times 10^5 \text{ 個}/\text{cm}^2$ 以下となり、好ましい条件では $1 \times 10^4 \text{ 個}/\text{cm}^2$ 以下であることが望ましい。

【0010】本発明は、凸部の上面に、窒化物半導体が成長しないか又は成長しにくい材料からなる保護膜が形成されているので、窒化物半導体の成長可能な面を、露出させた第1の窒化物半導体層の端面と凹部の底面としている。更に、本発明は、横方向の成長（第1の窒化物半導体層の端面からの成長）が優先して行われるように凹凸の形状を調整してある。このように第2の窒化物半導体層の成長可能な成長面及び成長速度をコントロールして、第1の窒化物半導体層の上に第2の窒化物半導体層を成長させると、成長初期に凹部の底面に縦方向の成長を始めた窒化物半導体の成長が抑制され、最終的には横方向の成長を始めた窒化物半導体同士が凹部の上部で接合するため、凹部底面からの成長が中断されるか、あるいは、凹部の底面には窒化物半導体がほとんど成長しない。従って、成長された第2の窒化物半導体層は、第1の窒化物半導体層の端面から横方向に成長を始めた窒化物半導体によって形成されていることから、結晶欠陥の少ない結晶性の良好な薄膜の窒化物半導体基板となる。

【0011】ここで、異種基板と窒化物半導体層との界面で発生する結晶欠陥は、窒化物半導体が縦方向に成長する場合は縦方向に転位し続ける傾向があるが、窒化物半導体の横方向の成長と共に結晶欠陥も横方向に転位すると、窒化物半導体が再び縦方向に成長しても、結晶欠陥は再び縦方向に転位しにくくなる傾向がある。

【0012】本発明は、凹凸の形状が、第1の窒化物半導体層の端面の長さ (d) と、凹部の開口部の幅 (w) を調整して形成されており、好ましくは、d と w の関係が、 $0 < w/d \leq 5$ となるように調整して形成される。このように、凹凸を形成すると、露出された第1の窒化物半導体層の端面への窒化物半導体の成長が凹部の底面への成長に対して優先されるようにコントロールするのに好ましく、第2の窒化物半導体層の表面に現れる結晶欠陥の数を激減させやすくなる。

【0013】また、本発明の成長方法により得られる結晶欠陥の少ない結晶性の良好な第2の窒化物半導体は窒化物半導体基板として用いられると、この上に積層成長させた素子構造の窒化物半導体も同様に、結晶欠陥のほとんどない結晶性の良好な素子となる。更に、基板として用いて作製された窒化物半導体素子は、結晶欠陥による劣化を著しく防止でき、ライフ時間を向上させることができ、LEDでは逆耐圧を著しく上昇させることができ

き、寿命特性の良好な窒化物半導体素子となる。以下、明細書内において、第2の窒化物半導体を単に窒化物半導体基板と言う場合がある。

【0014】

【発明の実施の形態】以下、図を用いて本発明を更に詳細に説明する。図1～図5は、本発明の窒化物半導体の成長方法の一実施形態を段階的に示した模式図である。

【0015】本発明の窒化物半導体の成長方法の一実施形態として、まず、図1の第1の工程において、異種基板1上に第1の窒化物半導体2を成長させ、図2のように第2の工程において、第1の窒化物半導体層2の上に保護膜3を形成させた後、第3の工程において、第1の窒化物半導体層2の端面を露出させるために、第1の窒化物半導体層2の一部を異種基板1まで除去して凹凸を形成し、第1の窒化物半導体層2の端面と凹部の底面

(露出された異種基板1面)を露出させ、更に前記凹凸を形成する際に、凹部の底面に対し第1の窒化物半導体層の端面への窒化物半導体の成長が優先されるように、露出された第1の窒化物半導体層の端面の長さと凹部の開口部の幅とを調整してあり、続いて図3の第4の工程において、保護膜及び凹凸を形成した第1の窒化物半導体層2上に、第2の窒化物半導体5を成長させ、図4に示すように厚膜の第2の窒化物半導体層(窒化物半導体基板)を形成させている。

【0016】以下に上記各工程ごとに図を用いて更に詳細に説明する。図1は異種基板1上に、第1の窒化物半導体2を成長させる第1の工程を行った模式的断面図である。この第1の工程において、用いることのできる異種基板としては、例えば、サファイアC面の他、R面、A面を主面とするサファイア、スピネル(MgAl₂O₄)のような絶縁性基板、SiC(6H、4H、3Cを含む)、ZnS、ZnO、GaAs、Si、及び窒化物半導体と格子整合する酸化物基板等、従来知られている窒化物半導体と異なる基板材料を用いることができる。好ましい異種基板としては、サファイア、スピネルが挙げられる。

【0017】また、第1の工程において、異種基板1上に第1の窒化物半導体2を成長させる前に、異種基板1上にバッファ層(図示されていない)を形成してもよい。バッファ層としては、AlN、GaN、AlGaN、InGaN等が用いられる。バッファ層は、900°C以下300°C以上の温度で、膜厚0.5μm～10オングストロームで成長される。このように異種基板1上にバッファ層を900°C以下の温度で形成すると、異種基板1と第1の窒化物半導体2との格子定数不正を緩和し、第1の窒化物半導体2の結晶欠陥が少なくなる傾向にある。300°C以上で形成すると、バッファ層が形成しやすくなる。

【0018】第1の工程において、異種基板1上に形成される第1の窒化物半導体2としては、アンドープ(不

純物をドープしない状態、undoped)のGaN、Si、Ge、及びS等のn型不純物をドープしたGaNを用いることができる。第1の窒化物半導体層2は、高温、具体的には900°Cより高い温度～1100°C、好ましくは1050°Cで異種基板1上に成長される。第1の窒化物半導体層2は、バッファ層より高温で成長させるため、アンドープでもバッファ層とは異なる。第1の窒化物半導体層2の膜厚は特に限定しないが、第1の窒化物半導体層2に凹凸を形成する際に、前記したように第2の窒化物半導体層の成長速度をコントロール可能な形状に凹凸を形成できる程度の膜厚、具体的には100オングストローム以上、好ましくは1～10μm程度、好ましくは1～5μmの膜厚で形成することが望ましい。

【0019】次に、図2は、第1の窒化物半導体層2の上に保護膜3を形成する第2の工程と、第1の窒化物半導体層2の一部を除去して凹凸を形成し第1の窒化物半導体層2の端面を露出させる第3の工程を行った模式的断面図である。第1の窒化物半導体層2に凹凸を形成することにより、成長可能な面として、第1の窒化物半導体層2の端面と凹部の底面とを露出させている。凸部上面には、窒化物半導体が成長しにくい又は成長しない材料からなる保護膜3が形成されている。更に凹凸の形状は、第1の窒化物半導体層2の端面への窒化物半導体の成長が、凹部底面への成長に対して優先されるように調整して形成されている。

【0020】本発明において、凹凸の形状は、特に限定されないが、上記のように特定の面に優先して窒化物半導体が成長するように調整して形成されればよく、好ましい凹凸の形状としては、凹部の側面である第1の窒化物半導体層の端面の長さ[図2のd]と、凹部の開口部の幅[図2のw]を調整して形成されている。更に好ましくは、凹凸の形状が、露出された第1の窒化物半導体層の端面の長さ(d)と凹部の開口部の幅(w)との関係、w/dが、0 < w/d ≤ 5、好ましくは0 < w/d ≤ 3、より好ましくは0 < w/d ≤ 1を示すように調整して形成されると、成長速度を良好にコントロールでき第1の窒化物半導体層2の端面からの成長を促進できる。このように、第1の窒化物半導体層2の端面からの成長を優先させることにより、凹部の底面での窒化物半導体の成長を中断できる。凹部の底面は、第1の窒化物半導体層、または異種基板のいずれでも良く、好ましくは異種基板面である。凹部の底面が異種基板面であると、窒化物半導体の成長が、異種基板に対し窒化物半導体に成長し易いことから、第1の窒化物半導体層の端面への成長を優先して行わせるのに好ましい。

【0021】第2の工程において、保護膜3を形成するとは、第1の窒化物半導体層2を一部除去して、第1の窒化物半導体層2の表面に現れる凹凸の形状にあわせて凸部の上面に、例えば図2のように、保護膜3が形成されるように第1の窒化物半導体層表面に形成することで

ある。凹凸の保護膜3の形成面の形状は、特に限定されずいずれの形状でも良く、例えば、前記w/dの関係に加えて更に、凹凸をされた第1の窒化物半導体層2を上から見た形状が、ランダムな窪み、ストライプ状、基盤面状、ドット状に形成することができる。

【0022】凹凸をストライプ状の形状とする場合、ストライプの形状として、例えばストライプ幅を10~20μm、ストライプ間隔(凹部の開口部)を2~5μmのものを形成することができる。

【0023】第2の工程で凹凸を形成する方法としては、第1の窒化物半導体層の一部を取り除くことができる方法であればいずれの方法でもよく、例えばエッチング、ダイシング等が挙げられる。エッチングにより、第1の窒化物半導体層2に部分的(選択的)に凹凸を形成する場合は、フォトリソグラフィー技術における種々の形状のマスクパターンを用いて、ストライプ状、基盤目状等のフォトマスクを作製し、レジストパターンを第1の窒化物半導体層2に形成してエッチングすることにより形成できる。また、ダイシングで行う場合は、例えば、ストライプ状や基盤目状に形成できる。

【0024】第2の工程において窒化物半導体をエッチングする方法には、ウニットエッティング、ドライエッティング等の方法があり、平滑な面を形成するには、好ましくはドライエッティングを用いる。ドライエッティングには、例えば反応性イオンエッティング(RIE)、反応性イオンビームエッティング(RIBE)、電子サイクロotronリニエッティング(ECR)、イオンビームエッティング等の装置があり、いずれもエッティングガスを適宜選択することにより、窒化物半導体をエッティングしてできる。例えば、本出願人が先に出願した特開平8-17803号公報記載の窒化物半導体の具体的なエッティング手段を用いることができる。また、エッティングによって凹凸を形成する場合、エッティング面が、図2に示すように異種基板1に対して第1の窒化物半導体の端面がほぼ垂直となる形状、又は順メサ形状や逆メサ形状でもよく、第1の窒化物半導体層の側面に第2の窒化物半導体層が成長可能な形状であれば特に限定されない。本発明において、凹凸のエッティング面が順メサ形状や逆メサ形状である場合、第1の窒化物半導体層の端面の長さは、第1の窒化物半導体層の表面(凸部上面)から凹部の底面までの高さを前記第1の窒化物半導体層の端面の長さ(d)とする。

【0025】第2の工程で用いられる保護膜3としては、保護膜3の表面に窒化物半導体が成長しないか、若しくは成長しにくい性質を有する材料が挙げられる。保護膜3として、例えば酸化ケイ素(SiO₂)、酸化チタン(TiO₂)、酸化ジルコニウム(ZrO₂)、酸化アルミニウム(Al₂O₃)等の酸化物、窒化ケイ素(Si₃N₄)等の窒化物、またこれらの多層膜の他、Ni、Mo、Ti、W等の1200°C以上の融点を有する金属

等をあげることができる。これらの保護膜材料は、窒化物半導体の成長温度600°C~1100°Cの温度にも耐え、その表面に窒化物半導体が成長しないか、成長しにくい性質を有している。保護膜材料を窒化物半導体表面に形成するには、例えば蒸着、スパッタ、CVD等の気相製膜技術を用いることができる。

【0026】また、第2の工程において、保護膜3は、凹凸を第1の窒化物半導体層2に形成する方法が、エッチングである場合と、ダイシングである場合とで、形成のされ方が多少異なる。まずエッチングで凹凸を形成する場合、第1の窒化物半導体層2上に保護膜を形成後、その上にレジスト膜を形成しパターンを転写し露光、現像して部分的に保護膜3を形成した後、第3の工程にて第1の窒化物半導体層2をエッチングすることで凹凸の形成を行う。次に、ダイシングで段差を形成する場合、第1の窒化物半導体層2の表面上に保護膜3を形成し(第2の工程)、この上から所望の形状にダイシング・ソードで第1の窒化物半導体層2に凹凸を形成する(第3の工程)と、凸部の上面部分のみに保護膜3が残り図2のようになる。

【0027】保護膜3の膜厚は、特に限定せず、第3の工程で凹部の第1の窒化物半導体層2の端面から優先して成長を始める第2の窒化物半導体層4が、保護膜3上であたかも成長したかのように第2の窒化物半導体層4が横方向に成長し易いように調整されていることが好ましい。例えば、保護膜3は薄く形成された方が、保護膜3上で隣接している第2の窒化物半導体層4同士が接合し易くなると考えられる。本発明において、凹部の底面での第1の窒化物半導体層2の縦方向の成長を防止する一実施の形態として、第1の窒化物半導体層の露出された端面の長さと、凹部の開口部の幅を調整することを挙げたが、本発明はこれに限定されない。

【0028】次に、図3は、保護膜及び凹凸を形成された凹部の側面(第1の窒化物半導体層2の端面)から第2の窒化物半導体層4を成長させる第4の工程を行った模式的断面図である。第4の工程においては、保護膜3が形成されているので、第2の窒化物半導体層4が成長可能な部分を、第1の窒化物半導体層2の端面と異種基板1面のみとし、更に凹凸部の形状を調整して第1の窒化物半導体層2の端面から成長する窒化物半導体層の成長を、凹部の底部からの成長より、優先されるようにしてある。この第4の工程において、成長の初期では、凹部底面からの縦方向のわずかな成長と、凹部側面からの横方向の成長が起こると推測されるが、成長を続けるうちに、凹部内の相対する側面から成長している第2の窒化物半導体層4同士が凹部内において接合し、凹部底面からの成長を制御し最後には成長を中断させる。このように凹部底面からの成長が中断することにより、図3の斜線部分に示すように、第2の窒化物半導体層4が成長していない空間が形成される傾向がある。更に、凹部内で接

合した第2の窒化物半導体層は、保護膜3の上部に向かって横方向に成長し、そして図3のように隣接している第2の窒化物半導体層4同士でつながり、図4のように第2の窒化物半導体層4があたかも保護膜3上に成長したかのような状態になる。このように凹部底面の縦方向から成長を始めた窒化物半導体の成長を中断させることにより、結晶欠陥の転位を減少させることができ、この結果、第2の窒化物半導体層の表面に現れる結晶欠陥を激減させることが可能となる。また、本発明の好ましい形態においては、凹部の底面からの窒化物半導体の成長がほとんど起こらない場合がある。このように成長初期に成長面と成長速度を特定された第2の窒化物半導体層4は、厚膜に成長させても、結晶欠陥の極めて少ない非常に良好な結晶性を有する。第2の窒化物半導体層4としては、前記第1の窒化物半導体層2と同様の、アンドープ又はn型不純物をドープしたGaNを用いることができる。

【0029】また第2の窒化物半導体層4は、この上に素子構造となる窒化物半導体を成長させるための基板となるが、素子構造を形成するには異種基板1、第1の窒化物半導体層2及び保護膜3（以下、異種基板等とする場合がある。）を予め除去してから行う場合と、異種基板1等を残して行う場合がある。このため前者の異種基板1等を除去する場合の第2の窒化物半導体層4の膜厚は、70μm以上、好ましくは100μm以上、より好ましくは500μm以上である。この範囲であると異種基板及び保護膜等を研磨除去しても、第2の窒化物半導体層4が割れにくくハンドリングが容易となり好ましい。異種基板1を除去する場合の第2の窒化物半導体層4の膜厚の上限は特に限定されず、異種基板1の大きさや成長方法により適宜調整され、例えば1mm程度の膜厚に成長させてもよい。

【0030】また後者の異種基板等を残して行う場合の第2の窒化物半導体層4の膜厚は、特に限定されないが、100μm以下、好ましくは50μm以下、より好ましくは20μm以下である。この範囲であると異種基板と窒化物半導体の熱膨張係数差によるウエハの反りが防止でき、更に素子基板となる第2の窒化物半導体層4の上に素子構造となる窒化物半導体を良好に成長させることができる。

【0031】本発明の窒化物半導体の成長方法において、第1の窒化物半導体2、及び第2の窒化物半導体層4を成長させる方法としては、特に限定されないが、MOVPE（有機金属気相成長法）、HVPE（ハライド気相成長法）、MBE（分子線エピタキシー法）、MOCVD（有機金属化学気相成長法）等、窒化物半導体を成長させるのに知られている全ての方法を適用できる。好ましい成長方法としては、膜厚が100μm以下ではMOCVD法を用いると成長速度をコントロールしやすい。また膜厚が100μm以下ではHVPEでは成長速

度が速くてコントロールが難しい。

【0032】また本発明において、第2の窒化物半導体層4上には、素子構造となる窒化物半導体を形成することができるので、明細書内において第2の窒化物半導体層4を素子基板又は窒化物半導体基板と言う場合がある。

【0033】また第1の工程における前記異種基板となる材料の正面をオフアングルさせた基板、さらにステップ状にオフアングルさせた基板を用いることもできる。

10 更に好ましい異種基板としては、(0001)面[C面]を正面とするサファイア、(112-0)面[A面]を正面とするサファイア、又は(111)面を正面とするスピネルである。ここで異種基板が、(0001)面[C面]を正面とするサファイアであるとき、前記保護膜がそのサファイアの(112-0)面[A面]に対して垂直なストライプ形状を有していること〔窒化物半導体の(101-0)[M面]に平行方向にストライプを形成すること〕が好ましく、また(112-0)面[A面]を正面とするサファイアであるとき、前記保護膜はそのサファイアの(11-02)面[R面]に対して垂直なストライプ形状を有していることが好ましく、また(111)面を正面とするスピネルであるとき、前記保護膜はそのスピネルの(110)面に対して垂直なストライプ形状を有していることが好ましい。ここでは、保護膜がストライプ形状の場合について記載したが、本発明においてサファイアのA面及びR面、スピネルの(110)面に窒化物半導体が横方向に成長しやすいので、これらの面に第1の窒化物半導体層2の端面が形成されるように第1の窒化物半導体層2層に凹凸を形成するために保護膜の形成を考慮することが好ましい。

【0034】本発明に用いられる異種基板について図を用いて更に詳細に説明する。図5は窒化物半導体の結晶構造を示すユニットセル図である。窒化物半導体は正確には菱面体構造であるが、このように六方晶系で近似できる。まず本発明の方法において、C面を正面とするサファイアを用い、保護膜はサファイアA面に対して垂直なストライプ形状とする場合について説明する。例えば、図6は正面側のサファイア基板の平面図である。この図はサファイアC面を正面とし、オリエンテーションフラット（オリフラ）面をA面としている。この図に示すように保護膜のストライプをA面に対して垂直方向で、互いに平行なストライプを形成する。図6に示すように、サファイアC面上に窒化物半導体を選択成長させた場合、窒化物半導体は面内ではA面に対して平行な方向で成長しやすく、垂直な方向では成長しにくい傾向にある。従ってA面に対して垂直な方向でストライプを設けると、ストライプとストライプの間の窒化物半導体がつながって成長しやすくなり、図1～図4に示したような結晶成長が容易に可能となる。

50 【0035】次に、A面を正面とするサファイア基板を

用いた場合、上記C面を正面とする場合と同様に、例えばオリフラ面をR面とすると、R面に対して垂直方向に、互いに平行なストライプを形成することにより、ストライプ幅方向に対して窒化物半導体が成長しやすい傾向にあるため、結晶欠陥の少ない窒化物半導体層を成長させることができる。

【0036】また次に、スピネル ($MgAl_2O_4$) に対しても、窒化物半導体の成長は異方性があり、窒化物半導体の成長面を (111) 面とし、オリフラ面を (110) 面とすると、窒化物半導体は (110) 面に対して平行方向に成長しやすい傾向がある。従って、(110) 面に対して垂直方向にストライプを形成すると窒化物半導体層と隣接する窒化物半導体同士が保護膜の上部でつながって、結晶欠陥の少ない結晶を成長できる。なおスピネルは四方晶であるため特に図示していない。

【0037】本発明の窒化物半導体素子（以下本発明の素子と言う場合がある。）について以下に説明する。本発明の窒化物半導体素子は、前記した本発明の窒化物半導体の成長法により得られる第2の窒化物半導体層4（窒化物半導体基板）上に、素子構造となる少なくともn型及びp型の窒化物半導体が形成されてなるものである。本発明の窒化物半導体素子を構成する窒化物半導体としては、特に限定されず、少なくともn型及びp型の窒化物半導体が積層されていればよい。例えば、n型窒化物半導体層として、超格子構造を有するn型窒化物半導体層を有し、この超格子構造のn型層にn電極を形成することのできるn型窒化物半導体が形成されているもの等が挙げられる。また、窒化物半導体素子構造を形成するその他の構成は、例えば電極、素子の形状等、いずれのものを適用させてもよい。本発明の窒化物半導体素子の一実施の形態を実施例に示したが、本発明はこれに限定されない。

【0038】本発明の窒化物半導体素子構造となる窒化物半導体を成長させる方法は、特に限定されないがMOCVD（有機金属気相成長法）、HVPE（ハライド気相成長法）、MBE（分子線エピタキシー法）、MOCVD（有機金属化学気相成長法）等、窒化物半導体を成長させるのに知られている全ての方法を適用できる。好みの成長方法は、MOCVD法であり、結晶をきれいに成長させることができる。しかし、MOCVD法は時間がかかるため、膜厚が厚い場合には時間の短い方法で行うことが好み。また使用目的によって種々の窒化物半導体の成長方法を適宜選択し、窒化物半導体の成長を行うことが好み。

【0039】

【実施例】以下に本発明の実施例を示すが本発明はこれに限定されない。

【実施例1】実施例1における各工程を図1～図4を用いて示す。また実施例1はMOCVD法を用いて行った。

【0040】異種基板1として、2インチφ、C面を正面とし、オリフラ面をA面とするサファイア基板1を反応容器内にセットし、温度を510°Cにして、キャリアガスに水素、原料ガスにアンモニアとTMG（トリメチルガリウム）とを用い、サファイア基板1上にGaNよりなるバッファ層（図示されていない）を約200オングストロームの膜厚で成長させる。

【0041】バッファ層を成長後、TMGのみ止めて、温度を1050°Cまで上昇させる。1050°Cになったら、原料ガスにTMG、アンモニア、シランガスを用い、Siを $1 \times 10^{18} / cm^3$ ドープしたGaNよりなる第1の窒化物半導体層2を2μmの膜厚で成長させる。（図1）

【0042】第1の窒化物半導体層2を成長後、ストライプ状のフォトマスクを形成し、スペッタ装置によりストライプ幅15μm、ストライプ間隔（凹部の開口部の幅）2μmのSiO₂よりなる保護膜3を1μmの膜厚で形成し、続いて、RIE装置によりサファイア基板1までエッチングしてサファイア基板1を露出させて凹凸を形成することにより第1の窒化物半導体2の端面を露出させる（図2）。なお、ストライプ方向は、図6に示すように、オリフラ面に対して垂直な方向で形成する。

【0043】凹凸部を形成後、反応容器内にセットし、温度を1050°Cで、原料ガスにTMG、アンモニア、シランガスを用い、Siを $1 \times 10^{18} / cm^3$ ドープしたGaNよりなる第2の窒化物半導体層4を30μmの膜厚で成長させる（図3及び図4）。

【0044】第2の窒化物半導体層4を成長後、ウェーハを反応容器から取り出し、SiドープGaNよりなる窒化物半導体基板を得る。

【0045】得られた第2の窒化物半導体層4（本発明の窒化物半導体基板）の表面を透過型電子顕微鏡（TEM）により観察すると結晶欠陥が 1×10^5 個/cm²であり、従来のものにくらべて2ケタ以上減少した。

【0046】【実施例2】実施例1において、成長させた第1の窒化物半導体層2の表面上に保護膜を形成し、次にダイシングを行って凹凸を形成して図2のように凸部の上面に保護膜3を形成して第1の窒化物半導体層2の端面を露出させる他は同様にして、第2の窒化物半導体層4の窒化物半導体基板を得た。得られた窒化物半導体基板を実施例1と同様に結晶欠陥の数を測定した結果、実施例1と同様に良好な結果が得られた。

【0047】【実施例3】実施例1において、第1の窒化物半導体層2をエッチングする際に、第1の窒化物半導体層2が残る程度にエッチングし凹部の側面（第1の窒化物半導体層の端面）の幅を1.5μmとする他は同様にして行った。その結果、実施例1と同様に良好な結果が得られた。

【0048】【実施例4】実施例1において、第1の窒化物半導体層2の膜厚を2μm、1μm、4μmにする

他は同様にしてそれぞれ第2の窒化物半導体層4を得た。その結果、実施例1とほぼ同様にそれぞれ良好な結果が得られた。

【0049】[実施例5]以下、図7を元に実施例5について説明する。図7は本発明の成長方法により得られた窒化物半導体層を基板とする一実施の形態のLED素子の構造を示す模式断面図である。

【0050】実施例1で得られたウェーハのサファイア基板1、バッファ層、第1の窒化物半導体層2、及び保護膜3を研磨、除去し、第2の窒化物半導体層4の表面を露出させ、第2の窒化物半導体層4のみにする。但し、実施例1において、第2の窒化物半導体層4を成長させる際に膜厚を200μmとして行った。

【0051】次に、第2の窒化物半導体層4(SiドープGaN)を正面とするウェーハをMOVPE装置の反応容器内にセットし、1050°Cでこの第2の窒化物半導体層4の上にSiを $1 \times 10^{13}/\text{cm}^3$ ドープしたGaNよりなるバッファ層31を成長させる。このバッファ層31は通常900°C以上の高温で成長させる窒化物半導体単結晶層であり、先の基板との格子不整合を緩和するための低温で成長させるバッファ層とは区別される。

【0052】さらに、バッファ層31の上に膜厚20オングストローム、単一量子井戸構造のIn_{0.1}Ga_{0.9}Nよりなる活性層32、膜厚0.3μmのMgを $1 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ ドープA_{1.0}G_{0.0}Nよりなるp側クラッド層33、膜厚0.5μmのMgを $1 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ ドープGaNよりなるp側コンタクト層34を順に成長させる。

【0053】素子構造となるバッファ層31～p側コンタクト層34成長後、ウェーハを反応容器から取り出し、窒素雰囲気中で600°Cでアニーリングして、p側クラッド層33、p側コンタクト層34を低抵抗にする。その後、p側コンタクト層34側からエッチングを行い、第2の窒化物半導体層4の表面を露出させる。このように、活性層から下の窒化物半導体層をエッチングにより露出させ、チップ切断時の「切りしろ」を設けることにより、切断時にp-n接合面に衝撃を与えてくなるため、歩留も向上し、信頼性の高い素子が得られる。

【0054】エッチング後、p側コンタクト層34の表面のほぼ全面にNi/Auよりなる透光性のp電極35を200オングストロームの膜厚で形成し、そのp電極35の上に、ボンディング用のパット電極36を0.5μmの膜厚で形成する。p電極35形成後のチップの平面図(パット電極36側から見た図)を図8に示す。

【0055】p側電極形成後、第2の窒化物半導体層4の素子構造が形成されていない表面全面に、n電極37を0.5μmの膜厚で形成する。

【0056】その後、n電極側からスクライブし、第2の窒化物半導体層4のM面(101-0)と、そのM面上に垂直な面で劈開し、300μm角のLEDチップを得

る。このLEDは20mAにおいて、520nmの緑色発光を示し、出力は従来のサファイア基板上に窒化物半導体素子構造を成長されたものに比較して2倍以上、静電耐圧も2倍以上と、非常に優れた特性を示した。

【0057】[実施例6]以下、図9を元に実施例6について説明する。図9は本発明の成長方法により得られた窒化物半導体層を基板とする一実施の形態のレーザ素子の構造を示す模式断面図である。

【0058】実施例1で得られたウェーハのサファイア基板1、バッファ層、第1の窒化物半導体層2、及び保護膜3を研磨、除去し、第2の窒化物半導体層4の表面を露出させ、第2の窒化物半導体層4のみにする。但し、実施例1において、第2の窒化物半導体層4を成長させる際に膜厚を200μmとして行った。

【0059】次に、第2の窒化物半導体層4(SiドープGaN)を正面とするウェーハをMOVPE装置の反応容器内にセットし、この第2の窒化物半導体層4の上に下記各層を形成する。

【0060】(n側クラッド層43)次に、Siを $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ ドープしたn型Al_{0.2}G_{0.8}Nよりなる第1の層、20オングストロームと、アンドープ(undope)のGaNよりなる第2の層、20オングストロームとを交互に100層積層してなる総膜厚0.4μmの超格子構造とする。n側クラッド層43はキャリア閉じ込め層、及び光閉じ込め層として作用し、Alを含む窒化物半導体、好ましくはAlGaNを含む超格子層とすることが望ましく、超格子層全体の膜厚を100オングストローム以上、2μm以下、さらに好ましくは500オングストローム以上、1μm以下で成長させることが望ましい。超格子層にするとクラックのない結晶性の良いキャリア閉じ込め層が形成できる。

【0061】(n側光ガイド層44)続いて、Siを $1 \times 10^{11}/\text{cm}^3$ ドープしたn型GaNよりなるn型光ガイド層44を0.1μmの膜厚で成長させる。このn側光ガイド層44は、活性層の光ガイド層として作用し、GaN、InGaNを成長させることができが望ましく、通常100オングストローム～5μm、さらに好ましくは200オングストローム～1μmの膜厚で成長させることができが望ましい。このn側光ガイド層44は通常はSi、Ge等のn型不純物をドープしてn型の導電型とするが、特にアンドープにすることもできる。超格子とする場合には第1の層及び第2の層の少なくとも一方にn型不純物をドープしてもよいし、またアンドープでも良い。

【0062】(活性層45)次に、Siを $1 \times 10^{11}/\text{cm}^3$ ドープのIn_{0.2}G_{0.8}Nよりなる井戸層、25オングストロームと、Siを $1 \times 10^{11}/\text{cm}^3$ ドープのIn_{0.05}G_{0.95}Nよりなる障壁層、50オングストロームを交互に積層してなる総膜厚175オングストロームの多重量子井戸構造(MQW)の活性層45を成長させる。

【0063】(p側キャップ層46) 次に、バンドギャップエネルギーがp側光ガイド層47よりも大きく、かつ活性層45よりも大きい、Mgを $1 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ ドープしたp型Al_{0.3}Ga_{0.7}Nよりなるp側キャップ層46を300オングストロームの膜厚で成長させる。このp側キャップ層46はp型としたが、膜厚が薄いため、n型不純物をドープしてキャリアが補償されたi型、若しくはアンドープとしても良く、最も好ましくはp型不純物をドープした層とする。p側キャップ層17の膜厚は0.1μm以下、さらに好ましくは500オングストローム以下、最も好ましくは300オングストローム以下に調整する。0.1μmより厚い膜厚で成長させると、p型キャップ層46中にクラックが入りやすくなり、結晶性の良い窒化物半導体層が成長しにくいかからである。Alの組成比が大きいAlGaN程薄く形成するとLD素子は発振しやすくなる。例えば、Y値が0.2以上のAl_yGa_{1-y}Nであれば500オングストローム以下に調整することが望ましい。p側キャップ層46の膜厚の下限は特に限定しないが、10オングストローム以上の膜厚で形成することが望ましい。

【0064】(p側光ガイド層47) 次に、バンドギャップエネルギーがp側キャップ層46よりも小さい、Mgを $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ ドープしたp型GaNよりなるp側光ガイド層47を0.1μmの膜厚で成長させる。この層は、活性層の光ガイド層として作用し、n側光ガイド層44と同じくGaN、InGaNで成長させることが望ましい。また、この層はp側クラッド層48を成長させる際のバッファ層としても作用し、100オングストローム～5μm、さらに好ましくは200オングストローム～1μmの膜厚で成長させることにより、好ましい光ガイド層として作用する。このp側光ガイド層は通常はMg等のp型不純物をドープしてp型の導電型とするが、特に不純物をドープしなくても良い。なお、このp型光ガイド層を超格子層とすることもできる。超格子層とする場合には第1の層及び第2の層の少なくとも一方にp型不純物をドープしてもよいし、またアンドープでも良い。

【0065】(p側クラッド層48) 次に、Mgを $1 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ ドープしたp型Al_{0.3}Ga_{0.7}Nよりなる第1の層、20オングストロームと、Mgを $1 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ ドープしたp型GaNよりなる第2の層、20オングストロームとを交互に積層してなるる総膜厚0.4μmの超格子層よりなるp側クラッド層48を形成する。この層はn側クラッド層43と同じくキャリア閉じ込め層として作用し、超格子構造とすることによりp型層側の抵抗率を低下させるための層として作用する。このp側クラッド層48の膜厚も特に限定しないが、100オングストローム以上、2μm以下、さらに好ましくは500オングストローム以上、1μm以下で成長させることが望ましい。なお本実施例では超格子層をn側クラッド

層側にも設けたが、n側クラッド層側よりもp側層側に超格子層を設けた方が、p層の抵抗値が減少する傾向にあるため、Vfを低下させる上で好ましい。

【0066】量子構造の井戸層を有する活性層45を有するダブルヘテロ構造の窒化物半導体素子の場合、活性層45に接して、活性層45よりもバンドギャップエネルギーが大きい膜厚0.1μm以下のAlを含む窒化物半導体よりなるキャップ層46を設け、そのキャップ層46よりも活性層から離れた位置に、キャップ層46よりもバンドギャップエネルギーが小さいp側光ガイド層47を設け、そのp側光ガイド層47よりも活性層から離れた位置に、p側光ガイド層47よりもバンドギャップが大きいAlを含む窒化物半導体を含む超格子層よりなるp側クラッド層48を設けることは非常に好ましい。しかもp側キャップ層46のバンドギャップエネルギーが大きくしてある、n層から注入された電子がこのキャップ層46で阻止されるため、電子が活性層をオーバーフローしないために、素子のリーク電流が少なくなる。

【0067】(p側コンタクト層49) 最後に、Mgを $2 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ ドープしたp型GaNよりなるp側コンタクト層49を150オングストロームの膜厚で成長させる。p側コンタクト層は500オングストローム以下、さらに好ましくは400オングストローム以下、20オングストローム以上に膜厚を調整する。

【0068】反応終了後、反応容器内において、ウェーハを窒素雰囲気中、700℃でアニーリングを行い、p型層をさらに低抵抗化する。アニーリング後、ウェーハを反応容器から取り出し、図9に示すように、RIE装置により最上層のp型コンタクト層49と、p型クラッド層48とをエッチングして、4μmのストライプ幅を有するリッジ形状とし、リッジ表面の全面にNi/Auよりなるp電極51を形成する。次に、図9に示すようにp電極51を除くp側クラッド層48、コンタクト層49の表面にSiO₂よりなる絶縁膜50を形成し、この絶縁膜50を介してp電極51と電気的に接続したpパット電極52を形成する。

【0069】p側電極形成後、第2の窒化物半導体層4の素子構造が形成されていない表面全面に、Ti/AIよりなるn電極53を0.5μmの膜厚で形成し、その上にヒートシンクとのメタライゼーション用にAu/Snよりなる薄膜を形成する。

【0070】その後、n電極側53からスクライブし、第2の窒化物半導体層4のM面(11-00、図5の六角柱の側面に相当する面)で第2の窒化物半導体層4を劈開し、共振面を作製する。共振面の両方あるいはどちらか一方にSiO₂とTiO₂よりなる誘電体多層膜を形成し、最後にp電極に平行な方向で、バーを切断してレーザチップとした。次にチップをフェースアップ(基板とヒートシンクとが対向した状態)でヒートシンクに設

置し、pパット電極52をワイヤーボンディングして、室温でレーザ発振を試みたところ、室温において、閾値電流密度 2.0 kA/cm^2 、閾値電圧 4.0 V で、発振波長 405 nm の連続発振が確認され、1000時間以上の寿命を示した。

【0071】[実施例7] 図10は本発明の成長方法により得られた窒化物半導体層を基板とする一実施の形態のLED素子の構造を示す模式断面図であり、活性層32から上の素子構造としては、実施例5のLED素子と同様の構造を有する。このLED素子は実施例1で得られた第2の窒化物半導体層4の上に、下記の超格子層を有するn側クラッド層51を成長させる。また、実施例7においては、サファイア基板1、バッファ層、保護膜を除去せず行った。実施例7で用いる第2の窒化物半導体層4は、実施例1において第2の窒化物半導体層4を成長させる際にSiをドープせずに成長させた。

(n側クラッド層51) Siを $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ ドープしたn型 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ よりなる第1の層、20オングストロームと、アンドープ(undope)のGaNよりなる第2の層、20オングストロームとを交互に100層積層してなる総膜厚 $0.4 \mu\text{m}$ の超格子構造とする。超格子層にするとクラックのない結晶性の良いキャリア閉じ込めのクラッド層が形成できる。

【0072】次に、膜厚20オングストロームの単一量子井戸構造の $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ よりなる活性層32、膜厚 $0.3 \mu\text{m}$ のMgを 1×10^{20} ドープ $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ よりなるp側クラッド層33、膜厚 $0.5 \mu\text{m}$ のMgを 1×10^{20} ドープGaNよりなるp側コンタクト層34が順に積層された構造を有する。そしてp層側からエッチングを行いクラッド層51の表面を露出させてn電極37を形成し、一方p側コンタクト層のほぼ全面には透光性のp電極35と、そのp電極35の上に、ボンディング用のパット電極36を形成し、図10に示すような同一面側からn電極37とp電極35とを設けた構造とする。最後にサファイア基板の厚さを $50 \mu\text{m}$ 程度まで研磨して薄くした後、研磨面側をスクライプして $350 \mu\text{m}$ 角の素子とする。

【図1】



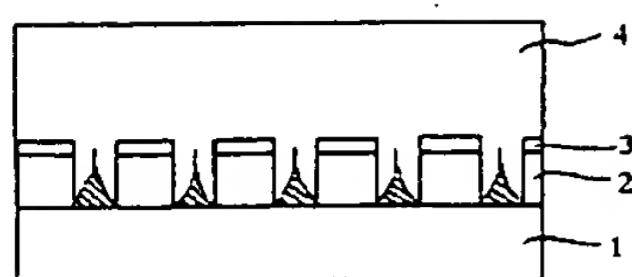
【図2】



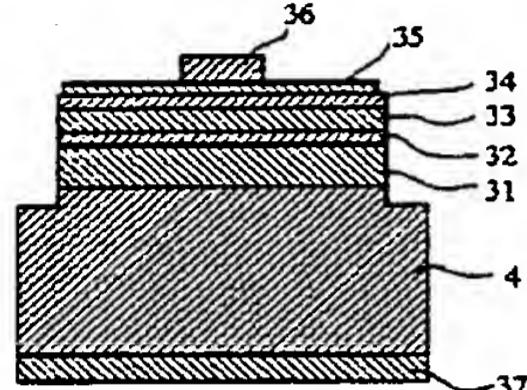
【図3】



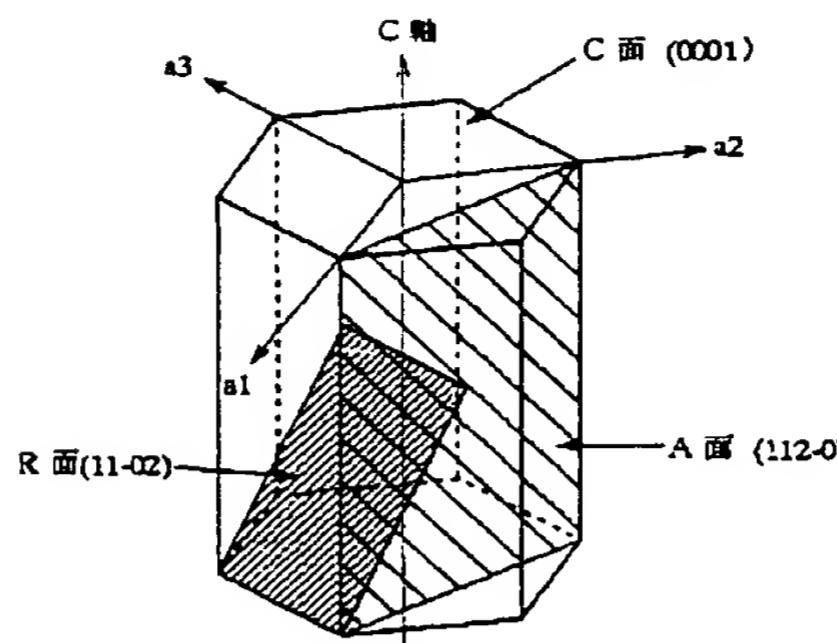
【図4】



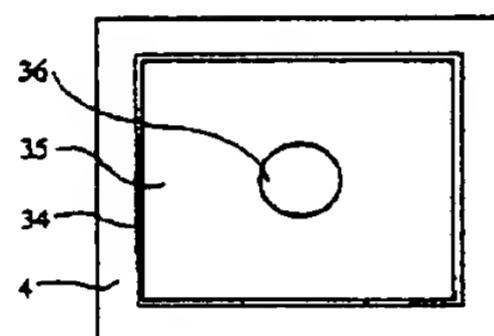
【図7】



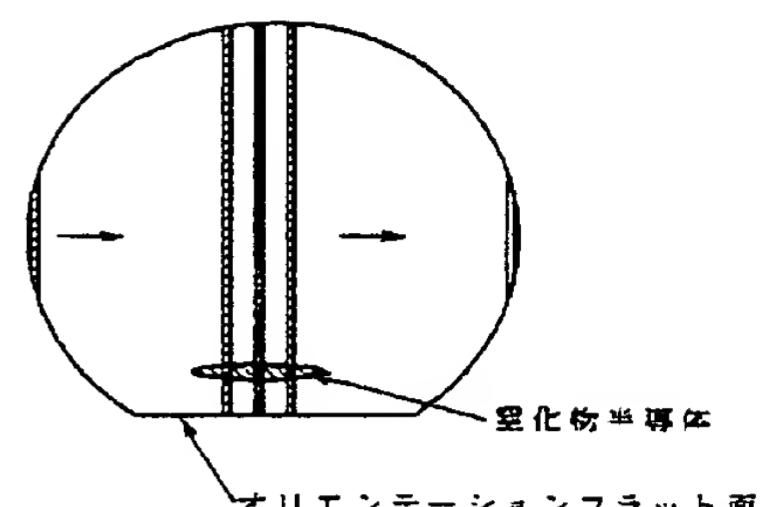
【図5】



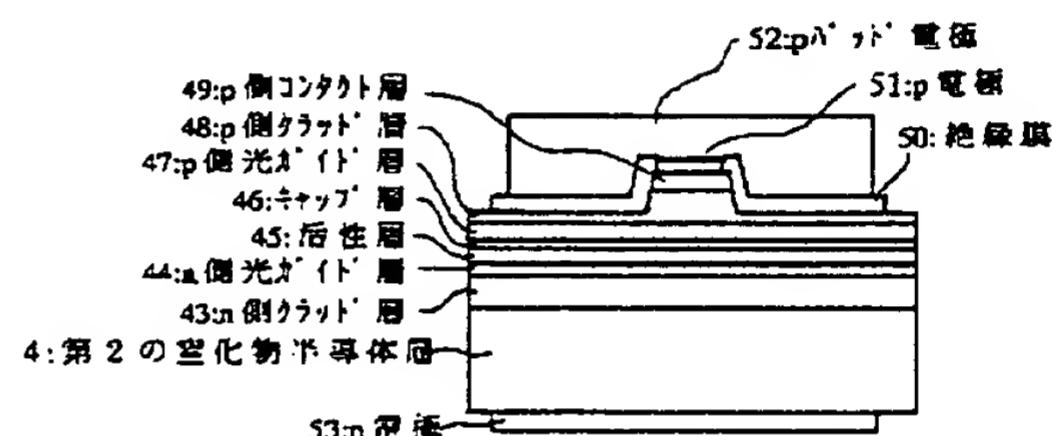
【図8】



【図6】



【図9】



【図10】

